

УДК 621.002.6:669.14/743.4 (47)

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА И СТАЛИ В ДУГОВОЙ ПЕЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА БОБРУЙСКОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ЗАВОДА

Л.Р. Дудецкая, А.П. Ласковнев, Н.В. Романова
Физико-технический институт НАН Беларуси
г. Минск, Беларусь
ОАО «Бобруйский машиностроительный завод»
г. Бобруйск, Беларусь

On the basis of comparison of technical-and-economic indexes and investigations of structure and properties of castings the analysis has been made of technical and technological advantages of production of iron-based casting alloys in a direct-current electric-arc furnace introduced into service at the Bobruysk Machine Building Plant.

Техническое перевооружение и реконструкция плавильных участков машиностроительных предприятий связаны в первую очередь с заменой физически и морально устаревших плавильных агрегатов с целью обеспечения возросших требований к качеству выплавляемых сплавов, условиям труда, охране окружающей среды, экономии ресурсов. Удовлетворению этих требований в полной мере отвечают однофазные дуговые печи постоянного тока (ДППТУ), обладающих следующими преимуществами [1, 2]:

1) возможность выплавки любых сплавов из рядовой шихты без специальной подготовки материалов;

2) значительное уменьшение угара;

3) сокращение продолжительности плавки за счет рационального ввода энергии высокой удельной мощности;

4) уменьшение удельного расхода электроэнергии;

5) повышение физико-механических свойств сплавов за счет более глубокой очистки от вредных примесей.

На ОАО «Бобруйский машиностроительный завод» для выплавки специальных марок чугуна и стали используют электродуговые печи переменного тока (ДСП) номинальной емкостью 3,0 и 1,5 т.

Эти агрегаты морально и физически устарели, имеют низкие показатели рентабельности и качества производимых сплавов, не соответствуют современным требованиям экологических норм. Износ плавильного оборудования отрицательно сказывается на основных показателях производства отливок. В первую очередь это относится к отливкам из специальным марок чугуна и стали, спрос на которые постоянно растет, и их включение в номенклатуру выпуска литья позволило бы обеспечить стабильный рост производства и повышение конкурентоспособности предприятия при сбыте продукции.

Стремясь сделать процесс плавки более качественным, экономичным и экологически чистым, Бобруйский машиностроительный завод приобрел у российской научно-технической фирмы «ЭКТА» 6-тонную универсальную электродуговую печь (ДППТУ-6). Подобные плавильные агрегаты на предприятиях РБ не эксплуатировались. В июне 2011 года печь была введена в промышленную эксплуатацию.

Из-за отсутствия у работников завода практического опыта работы на печах новой конструкции для освоения нового плавильного агрегата потребовалось выполнить значительный объем научно-исследовательских и опытно-технологических работ.

ческих работ, связанных с переводом основной массы сплавов в новом плавильном агрегате. В первую очередь это коснулось высокохромистых чугунов для отливок грунтовых насосов, которые составляют основную часть выпускаемой заводом продукции. Информация о свойствах высокохромистых чугунов и высоколегированных кислотоупорных сталей, выплавляемых в электродуговых печах постоянного тока, практически отсутствует. В то же время преимущества перевода высоколегированных сплавов на выплавку в электродуговых печах постоянного тока очевидны в связи с низким угаром дорогих легирующих элементов и модификаторов, снижением затрат электроэнергии, улучшением структуры отливок.

Целью выполняемых исследований являлось проведение сравнительного анализа структуры и свойств указанных сплавов, выплавляемых в действующих на заводе дуговых электропечах переменного тока и в новом плавильном агрегате.

Дуговые печи постоянного тока предназначены для производства качественного литья на основе свежих шихтовых материалов и лома рядовых и высоколегированных марок чугуна и стали, цветных сплавов и других металлических материалов. Особенности конструкции позволяют реализовать при эксплуатации новых плавильных агрегатов следующие технологические преимущества (табл. 1) [3–7].

Высокий эффект от внедрения дуговых печей постоянного тока позволяет улучшить качество выплавляемых сплавов, достигается за счет правильной организации процесса расплавления шихты, использования управляемого гидродинамического перемешивания расплава и взаимодействия его с дугой, что обеспечивает отсутствие заметного локального перегрева расплава во всех периодах плавки, гомогенность его температуры и химического состава, эффективное взаимодействие расплава и шлака, высокую скорость про-

текания металлургических реакций, низкий угар шихты и ферросплавов, подавление взаимодействия печной среды с окружающим пространством, что обеспечивает снижение расхода электроэнергии, возможность проведения в чистом виде всех металлургических процессов, разработанных для печей с кислой и основной футеровкой явилось изменение режима плавения, конструкции и материала подовых электродов. Это позволило практически устранить угар шихты, увеличить эффективную поверхность взаимодействия металла и шлака, устранить локальные перегревы металла под дугой, обеспечить равномерность температуры и химического состава во всем объеме расплава, глубокое удаление неметаллических включений и растворенных газов. За счет этого произошел рост качества сплавов, практически недостижимый на других типах печей. По литературным данным и результатам, полученных авторами, предел прочности серого чугуна возрастает на 30–40 %, высокопрочного чугуна на 20 % при одновременном увеличении пластичности.

В связи с более низким угаром легирующих элементов, сокращением продолжительности плавки и активным перемешиванием расплава результатом использования для выплавки чугуна и стали постоянного тока является их более точное соответствие требованиям стандартов по содержанию компонентов, что обеспечивает постоянство химического состава и снижение брака по качеству отливок.

Для проведения исследований и испытаний были выбраны наиболее характерные и перспективные для ОАО «Бобруйский машиностроительный завод» с точки зрения производства литейные сплавы:

- 1) высокохромистый чугун электродуговой плавки;
- 2) серый чугун ваграночной плавки;
- 3) сталь углеродистая электродуговой плавки.

Табл. 1

Сравнительные показатели работы плавильных агрегатов

| Показатель | Индукционные печи средней частоты | Дуговые печи переменного тока | Дуговые печи постоянного тока |
|--|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Длительность расплавления, мин | 40–45 | 60–85 | 35–50 |
| Удельный расход электроэнергии, кВтч/т | 500–600 | 650–750 | 450–550 |
| Удельный расход электродов, кг/т | — | 5–7 | 1,5 |
| Общий угар, % | 2–3 | 5–8 | 0,2–1,5 |

Основные требования к шихтовым материалам

Шихтовые материалы используют без специальной подготовки. Допускается использование шихты больших габаритов, содержащей влагу и СОЖ. Брикетирование легковесной шихты не обязательно. Поскольку объем печного пространства соответствует объему переплавляемой шихты, завалка обычно производится в один прием.

В связи со значительным повышением цен на чушковые (литейные и передельные) чугуны становится весьма актуальным освоение технологии получения чугунов с использованием вместо чушковых чугунов стального лома. В связи с этим были изучены результаты проведения плавки на действующих в России универсальных однофазных дуговых печах постоянного тока (ДППТУ), действующих в России универсальных однофазных дуговых печах постоянного тока (ДППТУ) с использованием в шихте чушковых чугунов и без них. Для введения в расплав углерода применяли графитовую крошку.

В табл. 2 и 3 приведены результаты определения химического состава и механических свойств серого чугуна для двух вариантов выплавки.

Механические свойства серого чугуна в зависимости от состава шихты приведены в табл. 3.

Полученные результаты свидетельствуют в пользу поведения плавки без использования в составе шихты чушковых чугунов. Кроме повышения уровня свойств необходимо учитывать удешевление шихты и возможность приобретения стального лома на внутреннем рынке.

Плавка в ДППТУ имеет ряд технологических особенностей, которые необходимо учитывать при ее организации. Процесс разделяется на три периода, каждый из которых проводят на постоянной мощности дуги.

1. Подготовительный период. Его проводят на высоком напряжении и небольшом токе дуги. Длинная дуга обеспечивает стабильный электрический режим и плавный нагрев всего объема шихты. При этом в шихте образуется воронка, исключая ее обрушивание на сводовый электрод.

2. Энергетический период. Ток дуги удваивают, а напряжение снижают в два раза. Около 20 % всей мощности передается через анодное пятно в расплав. Образовавшийся шлак отличается высокой подвижностью и из-за интенсивного перемешивания металла эффективно взаимодействует с расплавом.

3). Технологический период. Режим проводят при короткой дуге с напряжением, сниженным по сравнению с первым периодом в четыре раза при силе тока, увеличенной в четыре раза. При таком режиме доля энергии, передаваемой непосредственно от дуги в расплав, превышает 80 % от подведенной. При этом происходит доплавление шихты, нагрев и рафинирование расплава.

В процессе освоения печи постоянного тока в действующем производстве было проведено 6 плавки с полной садкой, в том числе, две плавки серого чугуна, две плавки углеродистой стали и две плавки хромистого чугуна.

Табл. 2

Химический состав серого чугуна для двух вариантов выплавки

| Условия выплавки чугуна | №№ проб | Компонентный состав расплава, мас. % | | | | | |
|-----------------------------------|---------|--------------------------------------|------|------|-------|-------|------|
| | | C | Mn | Si | S | P | Cr |
| С использованием чушковых чугунов | 1 | 3,12 | 0,70 | 2,34 | 0,040 | 0,070 | 0,23 |
| | 2 | 3,34 | 0,72 | 2,29 | 0,029 | 0,070 | 0,10 |
| С использованием стального лома | 1 | 3,12 | 0,70 | 2,14 | 0,040 | 0,073 | 0,24 |
| | 2 | 3,36 | 0,75 | 2,34 | 0,031 | 0,074 | 0,10 |

Табл. 3

Механические свойства серого чугуна при двух вариантах выплавки

| Условия выплавки чугуна | №№ проб | Механические свойства | |
|-----------------------------------|---------|---|---------------|
| | | Предел прочности при растяжении, σ_r , МПа | Твердость, НВ |
| С использованием чушковых чугунов | 1 | 254 | 197 |
| | 2 | 254 | 197 |
| С использованием стального лома | 1 | 324 | 229 |
| | 2 | 299 | 212 |

При выплавке серого чугуна в качестве шихты использовали чушковые чугуны, стальной и чугунный лом, отходы и возврат серого чугуна, кокс литейный, электродный бой. Расчет шихты производили на 3,7 % по кремнию, на средний предел по марганцу. В процессе плавления в печь присаживали шлакообразующие для ускорения образования шлака. Густой шлак разжижали плавиковым шпатом, жидкий исправляли добавками извести. После расплавления металла и достижения температуры 1350–1400 °С отбирали пробу для химического анализа и вводили расчетное количество ферромарганца и ферросилиция. При выплавке хромистого чугуна никель вводили в завалку, феррохром – после расплавления металла. При получении повышенного содержания углерода проводили окислительный процесс, при пониженном содержании углерода присаживали в плавку карбюризатор. Сравнительные показатели результатов исследования структуры и свойств серого чугуна при выплавке в ДППТУ-6 и вагранке приведены в табл. 4.

Выплавка углеродистой стали

При выплавке стали плавку вели переплавом отходов углеродистых марок стали и соответствующих ферросплавов из расчета получения в металле после расплавления шихты содержания углерода, обеспечивающего нормальное проведение рафинирования. Для раннего образования шлака в завалку давали известь, шамот и другие шлакообразующие компоненты в количестве до 1,5 % от массы завалки. После расплавления шихты плавку до ее окончания вели с перемешиванием. К началу восстановительного периода металл нагревали до температуры на 10–20 °С ниже температуры выпуска.

Раскисление металла производили присадкой ферромарганца (на нижний предел), ферросилиция на 0,20–0,25 %. Ферросилиций присаживали в печь не позднее, чем за 10 минут до выпуска

плавки в хорошо раскисленный металл из расчета не менее, чем на 0,15 % кремния. Ферромарганец вводили в металл в начале восстановительного периода, корректировку проводили не позднее, чем за 10 минут до выпуска плавки.

Однородность химического состава и температуры расплава, уменьшение содержания неметаллических включений при плавке в ДППТУ создают благоприятные условия для улучшения структуры металла, что приводит к повышению уровня механических свойств стали на 30–35 %. Результаты исследования макро- и микроструктуры образцов стали 45Л приведены в табл. 5.

Сравнительные показатели структуры и качества высокохромистого чугуна ЧХ22Г приведены в табл. 6.

На рис. 1 и 2 представлены фотографии микроструктуры образцов высокохромистого чугуна и углеродистой стали, в литом состоянии. Для выявления неметаллических включений использовали темнопольное изображение.

Анализ приведенных микрофотографий позволяет сделать следующие предварительные выводы о влиянии технологии плавки и используемого плавильного агрегата на микроструктуру сплавов в литом состоянии.

1) Плавка в ДППТУ способствует удалению из расплава неметаллических включений, что приводит к повышению уровня механических свойств. Нужно, однако, отметить, что, как правило, в печах постоянного тока используют хромомагнетитовую футеровку, тогда, как в действующих агрегатах переменного тока в основном применяется набивная «кислая» (кварцевая) футеровка, разрушающаяся в процессе плавки и обогащающая расплав неметаллическими включениями, преимущественно силикатами.

2) В результате низкого угара углерода и легирующих компонентов в ДППТУ при завалке одинаковой по количественному и качественному

Табл. 4

Показатели структуры и свойств серого чугуна в зависимости от способа выплавки

| Параметры | ДППТУ-6 | Вагранка |
|--|---------------|--------------------|
| Гомогенность температуры и химического состава | Обеспечена | Не обеспечена |
| Брак по газовым раковинам | Отсутствует | Присутствует |
| Брак по неспаям | Отсутствует | Присутствует |
| Распределение графитовых включений | Равномерное | Неравномерное |
| Микроструктура | 100 % перлита | Менее 40 % перлита |
| Соответствие сплава марке чугуна по ГОСТ 1412 | СЧ-30 | СЧ-20 |

Табл. 5

Макро- и микроструктура стали 45 в зависимости от способа выплавки

| Параметры | ДППТУ-6 | ДСП-1,5 |
|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Точечная неоднородность, балл | 3–4 | 1 |
| Ликвационные зоны | Отсутствует | Присутствует |
| Рыхлота осевая | Отсутствует | Присутствует |
| Неметаллические включения, балл | 3–4 | 1–2 |
| Структурные составляющие | Перлит 35 % + феррит 65 % | Перлит 55 % + феррит 45 % |
| Аустенитное зерно, балл | 6–7 | 4 |

Табл. 6

Макро- и микроструктура чугуна ЧХ22Г в зависимости от способа выплавки

| Параметры | ДППТУ-6 | ДСП-3,0 |
|---------------------------------------|--------------|---------------|
| Гомогенность химического состава | Обеспечена | Не обеспечена |
| Брак по газовым раковинам | Отсутствует | Присутствует |
| Содержание эвтектической составляющей | 90–100 % | 60–70 % |
| Наличие мартенситной составляющей | Присутствует | Отсутствует |
| Неметаллические включения, балл | 1–2 | 4 |
| Размер карбидов, мкм | 5 | 6,8 |

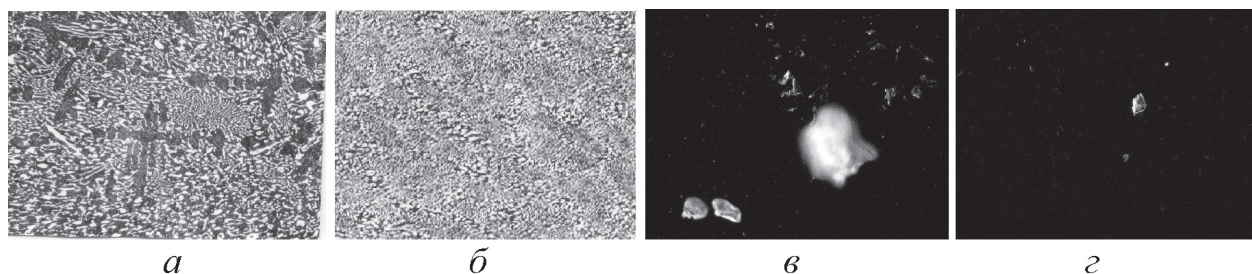


Рис. 1. Микроструктура образцов из высокохромистого чугуна ЧХ22Г в литом состоянии, выплавленного в ДСП-3,0 (а, в) и ДППТУ-6 (б, г), $\times 250$

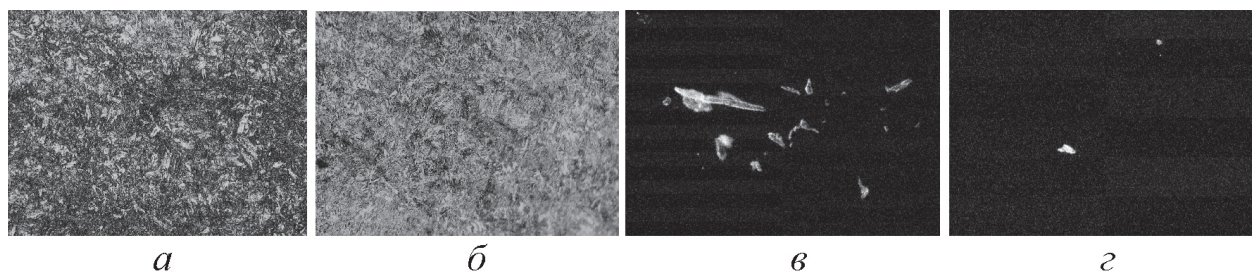


Рис. 2. Микроструктура образцов стали 45 в литом состоянии, выплавленной в ДСП-3,0 (а, в) и ДППТУ (б, г) $\times 250$

составу шихты состав плавки будет отличаться в пользу металла, выплавленного в печи постоянно-го тока по углероду и легирующим компонентам даже в пределах одной марки сплава. На фотографиях рис. 1 и 2 видно, что структура сплавов, выплавленных в печах постоянного тока, содержит большее количество перлита либо эвтектики, что приводит к повышению их свойств.

Заключение

На основании проведенных исследований выявлены основные преимущества структуры и свойств сплавов, выплавленных в печи постоянного тока. Разработаны технологические параметры выплавки высококачественных сплавов в печи постоянного тока при использовании основной и кислой футеровки. Из полученных результатов может быть сделан вывод об экономической целесообразности перевода на выплавку в ДППТУ высокохромистых чугунов марок (низкий угар компонентов при плавке), серых чугунов ваграночной плавки, а также стали 45 (максимальное количество заказов на отливки).

Освоение выплавки в ДППТУ-6,0 чугунов и сталей позволяет решить следующие технологические проблемы:

- 1) Регулирование в широком диапазоне состава расплава, его температуры и жидкого состояния.
- 2) Рафинирование сплавов от газов и неметаллических включений.
- 3) Применение наиболее дешевых, рядовых шихтовых материалов.
- 4) Стабилизация структуры и свойств, снижение уровня брака.
- 5) Обеспечение высокой производительности агрегата при высоком качестве продукции.
- 6) Улучшение условий работы персонала на плавильном участке.

Предварительный расчет экономической эффективности от использования ДППТУ-6 на ОАО «Бобруйский машиностроительный завод» показал, что при полном освоении в производстве нового плавильного агрегата экономический эффект составит более 2 млн. рублей на 1 тонну произведенного сплава.

Список использованных источников

1. Власова, И.Б. Универсальные дуговые печи постоянного тока нового поколения — средство эффективного решения проблем ресурсосбережения и экологии / И.Б. Власова, В.С. Малиновский // *Металлургия машиностроения*. — 2008, № 1.
2. Нехамин, С.М. Замена дуговых печей переменного тока (ДСП) на печи постоянного тока (ДППТ) / С.М. Нехамин // *Литье Украины*. — 2004 г., №4. — С. 33.
3. Малиновский, В.С. Универсальные дуговые печи нового поколения для металлургии и машиностроения / В.С. Малиновский, В.Д. Малиновский, И.Б. Власова // *Металлургия машиностроения*. — 2007, № 3. — С. 23.
4. Малиновский, В.С. Техничко-экономические результаты промышленного освоения дуговых печей постоянного тока нового поколения / В.С. Малиновский // *Металлургия машиностроения*. — 2004, № 6.
5. Сравнительный анализ характеристик дуговых печей постоянного тока нового поколения и индукционных печей / В.С. Малиновский [и др.] // *Литейщик России*. — 2002, № 1.
6. Об эффективности работы дуговых печей постоянного тока нового поколения при выплавке чугуна и стали / В.С. Афонаскин [и др.] // *Металлургия машиностроения*, 2004. — № 2, С. 2–6.
7. Малиновский, В.С. Дуговые печи постоянного тока нового поколения для металлургии машиностроения / В.С. Малиновский, Л.В. Ярных // *Металлургия машиностроения*, 2002. — № 1.